

04:12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ДИАФРАГМИРОВАННОЙ СЕТКОЙ I. ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ

© Н.И.Алексеев, В.Б.Каплан, А.М.Марциновский, Ф.Н.Расулов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,

194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 14 июля 1995 г.

В окончательной редакции 20 марта 1996 г.)

Рассматриваются плазменные ключевые элементы с "диафрагмированной" сеткой, в которых площадь сетки значительно меньше площади катода и анода. Такие приборы позволяют использовать обрывный механизм сеточного управления: когда плотность тока в плоскости диафрагмы становится близка к плотности хаотического тока, даже небольшое воздействие на сетку может привести к самопроизвольному обрыву тока. Проведены измерения эффективности сеточного управления при разной степени дифрагмирования в широком диапазоне токов. Выполнены зондовые измерения параметров плазмы в стационарном состоянии.

1. Существует большое число экспериментальных работ, где наблюдался самопроизвольный обрыв тока в газовом разряде при высоких плотностях тока. Явление состоит в том, что при попытке тем или иным способом увеличить плотность тока в разряде сверх некоторого критического значения j_{crit} этот ток быстро (\sim за 1 мкс) падает до величины, много меньшей первоначального значения.

Общие причины и пороги самопроизвольных обрывов достаточно хорошо известны. Обычно критическая плотность тока несколько меньше максимальной плотности хаотического тока j_x^{max} при предельной степени ионизации плазмы. Требование $j < j_x^{max}$ связано с условием существования приэлектродного слоя у катода [1]. Как правило, j_x^{max} пропорциональна давлению газа. Известно также, что при данном давлении j_x^{max} (и соответственно j_{crit}) может сильно уменьшаться в гетерогенных разрядах [3] — при наличии в разряде сеток, дополнительных стенок, сужений и т.п. за счет ухода ионов на внутренние поверхности и уменьшения предельной степени ионизации.

В зависимости от конкретных условий разряда дальнейшее поведение тока и распределения потенциала в разряде различны: ток может ограничиваться или прерываться полностью. В случае [1] когда плотность газа (и плазмы) неоднородна вдоль разряда, несоблюдение

неравенства $j \leq j_x$ в какой-либо точке приводило к возникновению виртуального катода и ограничению тока. В качестве причин ограничения тока в [1] предлагались дрейфовая и пирсовская неустойчивости, пороги которых, однако, совершенно отличны от $j = j_x$. Ограничение тока на уровне $j \sim j_x$ наблюдалось также в полых катодах низкого давления [3]. В [4] обрыву предшествовало возникновение двойного слоя с большим перепадом потенциала.

Явление самопроизвольных обрывов дает естественное направление в разработке сеточных ключевых элементов (СКЭ) — разрядных приборов, в которых подача на сетку положительных и отрицательных импульсов напряжения приводит соответственно к поджигу и гашению разряда [5]. Создавая условия, при которых токи или локальные плотности тока были бы порядка критического, можно существенно увеличить возможности приборов.

Ценность обрывных механизмов связана с тем, что эффективность метода очевидным образом растет с ростом тока и главный недостаток рассматривавшегося ранее “динамического” гашения [5] — ограничение по величине модулируемого тока снимается автоматически.

Развитие СКЭ на основе обрывов шло по нескольким путям.

1) КЭ с Cs-Ba наполнением [6,7]. Высокая плотность тока ($10-100 \text{ А/см}^2$) обеспечивались за счет адсорбции бария на катоде при давлении цезия $P_{Cs} \sim 10^{-3}-10^{-2} \text{ Тор}$, что создавало условия для самопроизвольного обрыва. В [6] исследовался КЭ с крупноструктурной сеткой, т.е. достигалась высокая гетерогенность разряда. Это обусловило достаточно высокую эффективность сеточного гашения, но сильно снизило верхний предел управляемых токов при заданном давлении Cs из-за низкой концентрации плазмы n ($n \ll$ концентрации N_{Cs} атомов Cs) и соответственно малой величины j_{crit} .

В [7] управление током осуществлялось с помощью сетки высокой прозрачности, т.е. при малой гетерогенности разряда ($n \sim N_{Cs}$). В этих условиях наблюдались очень стабильные и хорошо воспроизводимые самопроизвольные обрывы тока с крутым задним фронтом, так что роль сетки в гашении сводилась к синхронизации времени обрыва небольшим (порядка нескольких вольт) отрицательным импульсом. Эффективность работы таких ключей с ростом тока существенно повышалась.

2) Так как изготовление промышленных ключей с бинарной смесью связано с дополнительными технологическими трудностями, то опробывались и пути реализации обрывных механизмов в чисто цезиевом варианте. Цезиевые СКЭ с крупноструктурной (или объемной) сеткой исследовались в [8]. В них неустойчивой по отношению к напряжению на сетке оказалась сама пространственная конфигурация плазмы сеточного канала. Эффективность же управления во всем исследованном диапазоне давлений Cs получилась практически не зависящей от тока. Недостатком СКЭ с объемной сеткой оказалось относительно высокое прямое падение напряжения (3-4 В вместо 1.5-2 В в СКЭ с мелкоструктурной сеткой).

Поэтому естественным путем увеличения локальной плотности управляемого тока представлялось использование диафрагмированной сетки (ДС). Можно было надеяться, что обеспечение условий критического токопрохождения в области сеточной диафрагмы даст вы-

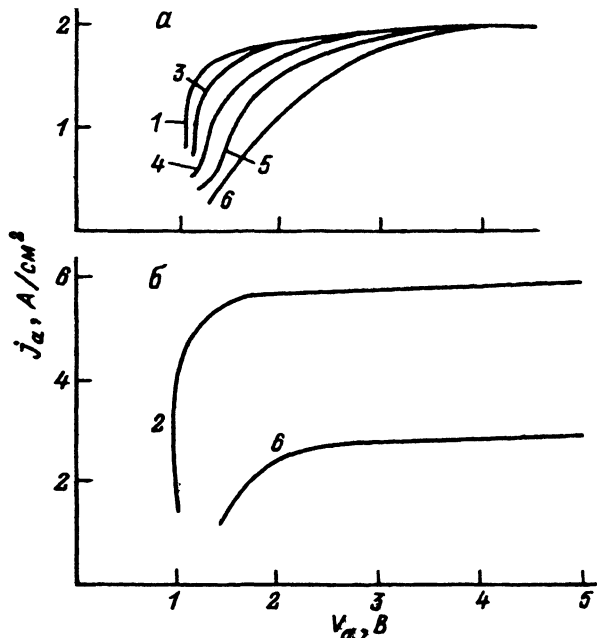


Рис. 1. Влияние степени диафрагмированности на ВАХ.

$P_{Cs} = 1.33 \cdot 10^{-2}$ Тор; D_g , мм: 1 — 14, 2 — 10, 3 — 7, 4 — 5, 5 — 4, 6 — 2.

сокую эффективность управления, в то время как увеличение прямого падения за счет диафрагмирования будет меньшим, чем на объемной сетке. Проверке этого предположения, а также детальному исследованию кинетики обрывного гашения, которое особенно удобно проводить на приборах такого типа (зондовая и спектроскопическая диагностика плазмы на приборах с Cs-Va наполнением крайне сложны), посвящена данная работа. Предполагалось при этом, что наблюдение изменений параметров плазмы до наступления обрыва может дать дополнительную информацию о физических процессах, вызывающих этот обрыв.

2. Для выяснения влияния степени диафрагмирования сетки на эффективность управления КЭ был исследован прибор, сеточный узел которого представлял собой набор из шести сеток с разными диафрагмами. Диафрагмы могли меняться в рабочем режиме прибора, при горящем разряде. Диаметр рабочей поверхности D_g сеток менялся от 14 до 2 мм, диаметр катода и анода составлял $D_c = D_a = 10$ мм, расстояния сетка-катод и сетка-анод соответственно 2 и 3 мм.

Измерения показали, что при небольшой степени диафрагмирования вольт-амперные характеристики (ВАХ) $j_a(V_a)$ (где $j_a = I_a/S_a$, S_a — площадь анода, I_a , V_a — ток и напряжение на аноде) при различных отрицательных смещениях $U_g^{(0)}$ на сетке (рис. 1, а) практически не отличаются от характеристик КЭ с мелкоструктурной сеткой, в которых площадь рабочей поверхности сетки соответствует рабочей поверхности катода и анода [5]. Ток насыщения в этом случае равен току эмиссии катода.

При относительном малом уровне эмиссии увеличенные степени диафрагмирования ведет к тому, что ВАХ все более смещается вправо и вертикальный участок трансформируется в наклонный. По-видимому, это связано с тем, что с ростом тока увеличивается вклад в него отдаленных от центра областей катода. Перенос тока с периферии требует большего роста напряжения, чем если бы ток переносился "по кратчайшему пути". Для сетки с диаметром диафрагмы $D_g = 2$ мм выход на насыщение "задержан" по сравнению с $D_g = 10$ мм (случай отсутствия диафрагмы) примерно на 2 В. На рис. 1, а плотность анодного тока j_a составляет $j_a \cong 1.6$ А/см². Как будет видно из других рисунков, при таком малом для давления $1.33 \cdot 10^{-2}$ Тор токе эффективность управления с уменьшением D_g/D_a снижается, т.е. диафрагмирование сетки с точки зрения модуляции бесполезно или даже вредно. Увеличение плотности тока в области диафрагмы не только не приводит к облегчению управления, связанному с появлением обрывного гашения, но и затрудняет гашение разряда сеточным импульсом из-за увеличения концентрации плазмы в районе сеточной диафрагмы.

При малых эмиссиях катода ток насыщения ВАХ для всех диафрагм одинаков и равен току эмиссии катода j_c^e . Однако начиная с некоторого значения эмиссии (примерно соответствующего кривой 2 на рис. 1, б) ток насыщения на малой диафрагме $D_g = 2$ мм перестает достигать уровня j_c^e — наступает ограничение плотности тока в плоскости диафрагмы (кривая б).¹ Будем называть этот ток критическим, а соответствующую ему плотность тока в диафрагме $j_d = 4I_a/\pi D_g^2$ — критической плотностью тока j_{crit} (в дальнейшем будем пользоваться именно этим определением j_{crit} , хотя по сути это та же величина, о которой идет речь в разделе 1). При $j_d \geq j_{crit}$ стационарное состояние разряда как таковое перестает реализовываться. Разряд быстро переходит в режим колебаний и в конце концов срывается (типичная диаграмма дана на рис. 2).

При токах $j_d \sim j_{crit}$ меняется и характер влияния сеточного смещения на ВАХ. Если диафрагмирование не очень сильное, то с ростом $|U_g^{(0)}|$ наблюдается лишь смещение вертикального участка вправо, причем чем сильнее диафрагмирование, тем эта тенденция слабее. Однако при $D_g = 2$ мм помимо смещения ВАХ с ростом $|U_g^{(0)}|$ начинает уменьшаться уровень насыщения. Область насыщения на ВАХ, где реально существует проводящее состояние, при этом резко сокращается и разряд переходит в область самопроизвольных обрывов (рис. 3). Через некоторое время после поджига возникают колебания (область напряжений V_a , где они появляются, показана штриховой кривой), и тем быстрее, чем больше $|U_g^{(0)}|$.

3. Так как конечным показателем работы КЭ является эффективность гашения, то ее измерения были выполнены для всего "спектра" диаметров диафрагмы. Типичные кривые эффективности гашения $E_a(V_g^q)$, где V_g^q — минимальная величина гасящего импульса, приведены на рис. 4, а для $j_a \cong 1$ А/см². Все значения относятся к точке $V_a = 2.5$ В для разных диафрагм. Как и в случае отсутствия диафрагмы

¹ В дальнейшем на всех рисунках номера кривых, относящихся к разным диафрагмам, соответствуют нумерации диафрагм на рис. 1.

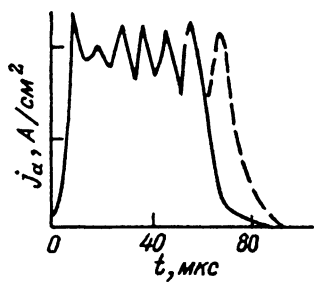


Рис. 2. Самопроизвольный срыв тока в разряде.

$P_{C_0} = 0.45 \cdot 10^{-2} \text{ Топ}$, $j_a^{(0)} \cong 1.0 \text{ А/см}^2$,
 $E_a = 10 \text{ В}$, $U_g^{(0)} = -3.5 \text{ В}$, $D_g = 2 \text{ мм}$.

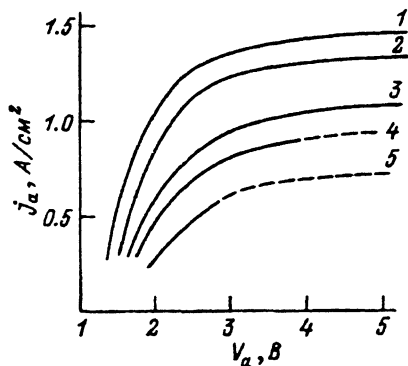


Рис. 3.

$P_{C_0} = 0.74 \cdot 10^{-2} \text{ Топ}$, $j_{\text{crit}} \sim 1.4 \text{ А/см}^2$,
 $j_a = 2.0 \text{ А/см}^2$; $U_g^{(0)}$, В: 1 — 1, 2 — 2,
 3 — 5, 4 — 6, 5 — 9.6.

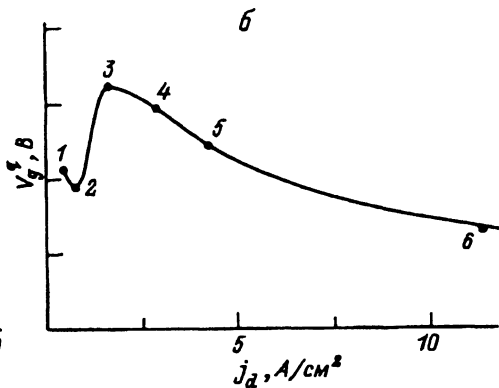
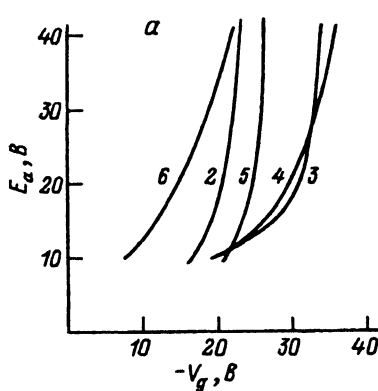


Рис. 4.

а: $P_{C_0} = 1.33 \cdot 10^{-2} \text{ Топ}$, $E_a = 20 \text{ В}$, $V_a \cong 2.5 \text{ В}$, D_g , мм: 2 — 10, 3 — 7, 4 — 5, 5 — 4, 6 — 2; б: $P_{C_0} = 1.33 \cdot 10^{-2} \text{ Топ}$, $E_a = 20 \text{ В}$, $V_a \cong 5 \text{ В}$.

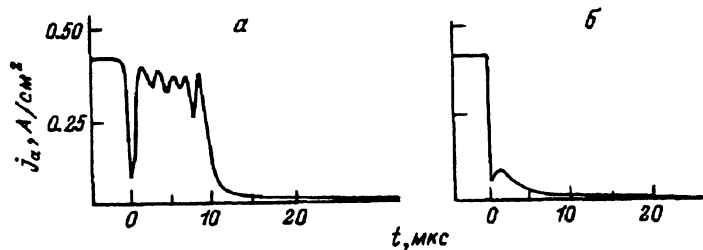


Рис. 5. Медленное (а) и быстрое (б) гашение.

$P_{C_0} = 1.33 \cdot 10^{-2} \text{ Топ}$, $E_a = 20 \text{ В}$, $U_g^{(0)} = -2 \text{ В}$, $j_a^{(0)} = 0.42 \text{ А/см}^2$; V_g , В: а — 30, б — -50.

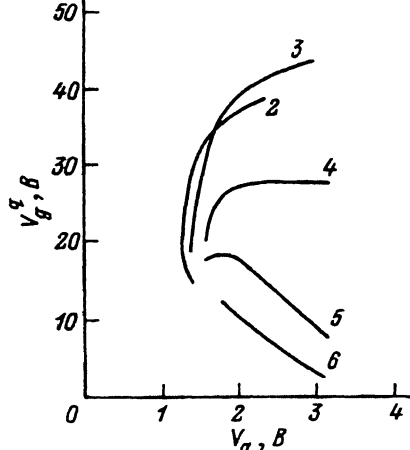


Рис. 6.
 $P_{C_0} = 0.74 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$, $j_a \cong 1.5 \text{ А/см}^2$; D_g (мм): 2 — 10, 3 — 7, 4 — 5, 5 — 4, 6 — 2.

[5], кривые почти вертикальны — эффективность модуляции слабо зависит от E_a . Однако при достаточно сильном диафрагмировании они смещаются влево, т.е. эффективность управления повышается (кривая 6).

На рис. 4, 6 дан срез приведенных кривых на уровне $E_a = 20 \text{ В}$, причем аргументом на оси абсцисс выбрана плотность тока в диафрагме j_d . Видно, что в широком диапазоне значений рост плотности тока (уменьшение D_g) приводит к росту эффективности сеточного управления. Улучшение гашения начинается уже с $j_d \sim j_{\text{crit}}/4$. В режимах с такими большими токами меняется и характер гашения. Подробно этот вопрос будет обсуждаться в части 2. Здесь же отметим, что в указанном диапазоне токов проводящее состояние может сохраняться достаточно долго — 10 и более мкс после подачи отрицательного импульса на сетку. Можно получить и быстрое гашение, но это требует существенного увеличения V_g (рис. 5). Иным оказывается и характер изменения эффективности гашения по ВАХ. На рис. 6 представлены зависимости $V_g^q(V_a)$ вдоль ВАХ для разных диаметров диафрагмы.

Видно, что пока степень диафрагмирования невелика ($D_g \geq 5 \text{ мм}$) и плотность тока в диафрагме не намного превосходит j_a , V_g^q растет с V_a при $D_g = 4 \text{ мм}$ выходит на насыщение при больших V_a , а при $D_g = 2 \text{ мм}$ уменьшается с самого начала. При токе $j_a \sim 1.5 \text{ А/см}^2$, когда j_d близка к критической, $V_g^q(V_a)$ доходит при $D_g = 2 \text{ мм}$ почти до нуля, т.е. наблюдается самопроизвольный обрыв тока без всякого гасящего импульса. С ростом эмиссии катода эти тенденции обостряются. При $j_a \sim 5 \text{ А/см}^2$ отрицательный наклон кривой $V_g^q(V_a)$ и выход на самопроизвольный обрыв достигаются уже для диафрагмы $D_g = 4 \text{ мм}$.

Обобщим эти данные, построив в одной шкале эффективности гашения вдоль ВАХ для разных диафрагм при $U_g^{(0)} \cong 0$ и постоянной эмиссии катода в виде зависимости $V_g^q(j_d)$ (рис. 7). Кривыми 1–6 показано быстрое гашение, характерное для недиафрагмированных сеток [3]. При $j_d \geq 5 \text{ А/см}^2$ наряду с быстрым появляется обрывное гашение

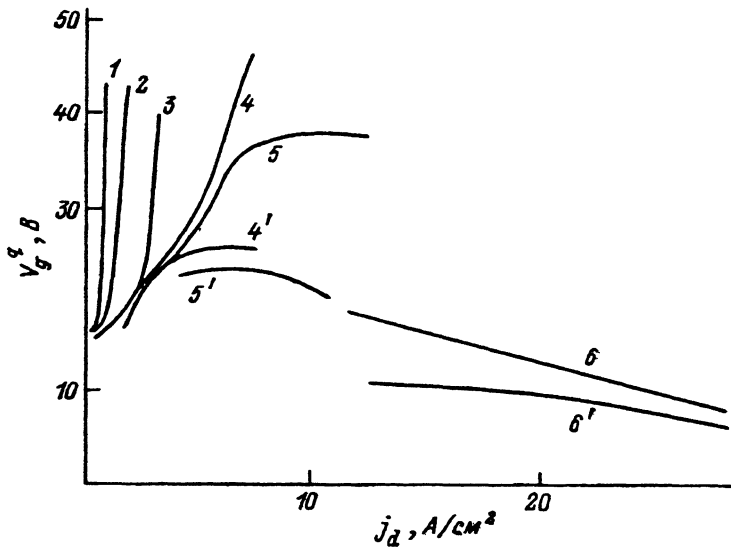


Рис. 7.
 $P_{Cs} = 0.74 \cdot 10^{-2}$ Top.

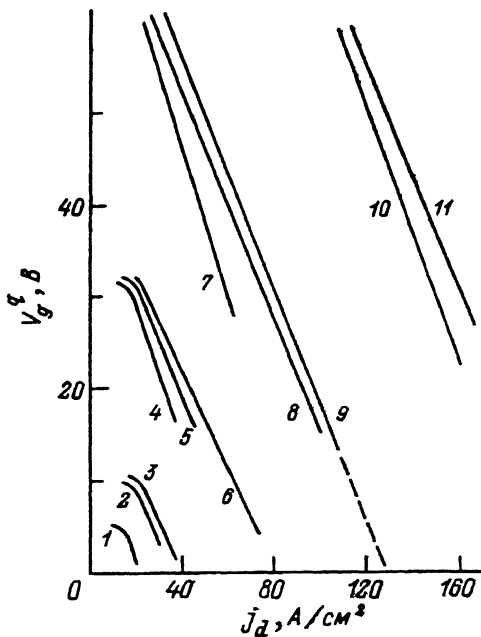


Рис. 8.
 P_{Cs} (Top): 1-3 — $0.74 \cdot 10^{-2}$; 4-6 — $1.33 \cdot 10^{-2}$; 7-9 — $2.4 \cdot 10^{-2}$; 10, 11 — $4 \cdot 10^{-2}$.

меньшим импульсом ($1'-6'$). Видно, что обрывные кривые хорошо продолжают друг друга. Это показывает, что аргумент j_d при $j_d \rightarrow j_{crit}$ действительно является достаточно универсальной характеристикой при данном P_{Cs} : при большом токе для обрывного гашения неважно, достигается ли данная плотность тока движением по ВАХ или диафрагмированием.

Отметим, что на приборе с рекордно высокой эмиссией при увеличении тока по ВАХ также удалось наблюдать переход к зависимостям $V_g(j_a \equiv j_d)$, подобным описанным выше: при увеличении j_a на них намечается ветвь обрывного гашения, т.е. с ростом тока V_g^q уменьшается.

Использование обрывного гашения в КЭ с диафрагмированной сеткой позволило существенно увеличить верхнюю границу управляемых токов и соответственно давлений паров цезия. Так, на исследованных приборах удалось осуществить полное управление вплоть до давлений $\sim 6.6 \cdot 10^{-2}$ Тор и плотностей тока $j_d \sim 150-200$ А/см². На рис. 8 приведены семейства кривых $V_g(j_d)$, относящиеся к разным давлениям цезия (внутри каждого семейства кривые отличаются величиной эмиссии катода) для широкого диапазона давлений. Слабая зависимость от тока позволяет рассматривать данные зависимости как универсальную диаграмму обрывных гашений при больших плотностях тока независимо от того, достигаются ли эти плотности диафрагмированием или за счет высокой эмиссии катода без диафрагмирования. Обращает на себя внимание, что а) зависимость $V_g^q(j_d)$ практически линейна, б) кривые смещаются при изменении тока и давления почти параллельно сами себе.

Продолжение кривых $V_g^q(j_d)$ до оси $V_g = 0$ означает по существу выход на режим самопроизвольного обрыва тока. Соответствующие значения j_d хорошо согласуются с зависимостью критического тока от давления.

Приведенные результаты получены на приборах с Pt катодом, где рост эмиссии катода в максимуме s -образной кривой $j_c^e(1/T_c)$ отстает от роста давления цезия. С другой стороны, критический ток растет пропорционально давлению. Поэтому относительная разница между j_{crit} и реально достижимой эмиссией катода с ростом давления растет и эффективность обрывного механизма понижается. Если бы можно было найти катоды с более высокой эмиссией, то область рабочих давлений еще более расширилась бы.

Таким образом, проведенные эксперименты убедительно показывают, что диафрагмирование сетки является простым техническим приемом, решающим проблему катода для цезиевых КЭ и обеспечивающим управляемые токи с плотностью $\sim 3-5$ А/см² (рассчитанной по площади анода) в условиях, когда катодный материал дает эмиссию всего лишь ~ 1 А/см² при максимальных рабочих для обычных КЭ давлениях цезия.

Список литературы

- [1] Незлин М.В. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. Вып. 5. С. 1048-1055.
- [2] Коненко О.Р., Мусин А.К., Утенкова С.Ф. // ЖТФ. 1973. Т. 43. Вып. 8. С. 1685-1693.
- [3] Льюжев Г.А., Старцев Е.А., Школьник С.М. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 12. С. 2495-2499.
- [4] Луценко Е.И., Середя Н.Д., Концевой Л.М. // Физика плазмы. 1976. Т. 2. Вып. 1. С. 72-82. ЖЭТФ. 1975. Т. 69. Вып. 5. С. 2067-2079.
- [5] Каплан В.Б., Макаров А.Н., Марциновский А.М. и др. // ЖТФ. 1977. Т. 47. Вып. 2. С. 274-286.
- [6] Кайбышев В.З., Кузин Г.А. // ЖТФ. 1975. Т.45. Вып.3. С.320-329.
- [7] Каплан В.Б., Марциновский А.М., Мустафаев В.Ф. и др. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 3. С. 527-532.
- [8] Алексеев Н.И., Каплан В.Б., Марциновский А.М. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 9. С. 70-86.